

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ НЕУПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ИЗГИБЕ И КРУЧЕНИИ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА $\text{Ti}_{49.3}\text{Ni}_{50.7}$ (АТ.%)¹ Д.Ю.ЖАПОВА, ^{1,2} А.А.ГУСАРЕНКО, ¹ В.Н.ГРИШКОВ¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томскangel.ru09@mail.ru

Сплавы на основе никелида титана являются яркими представителями группы функциональных материалов, обладающих термомеханической памятью (эффект памяти формы (ЭПФ) и эффектом сверхэластичности (СЭ)). Эти эффекты обусловлены термоупругими МП из высокотемпературной кубической В2 фазы в мартенситные R и В19' фазы с ромбоэдрической и моноклинной структурами, соответственно. Как при реализации эффекта сверхэластичности, так и при реализации ЭПФ материалы испытывают деформационные воздействия. При реализации эффекта сверхэластичности проводится изотермическое нагружение до некоторой заданной деформации, ϵ_t (при растяжении, сжатии или изгибе) или γ_t (при кручении) с последующей разгрузкой при этой же температуре (обычно выше температуры завершения обратного МП мартенсита В19' в В2 фазу). Наиболее распространённая схема реализации ЭПФ включает охлаждение образцов без приложенной нагрузки до температуры $T_d < M_K$ (температуры завершения МП в мартенсит В19'). Затем при температуре T_d приводится изотермическое нагружение до ϵ_t (или γ_t). Разгрузка при этой же температуре с последующим нагревом разгруженных образцов, в процессе которого реализуется однократный ЭПФ. Таким образом температура изотермических циклов «нагружение – разгрузка» (T_d) и величина заданной при этом деформации (ϵ_t или γ_t) являются важными параметрами, которые могут влиять на проявление эффектов сверхэластичности и ЭПФ в сплавах с термоупругими МП.

В данной работе представлены результаты исследования влияния температуры деформирования на ресурс обратимой неупругой деформации в пластически деформированных кручением и изгибом двойного сплава на основе никелида титана. Объектом исследования являлись образцы сплава $\text{Ti}_{49.3}\text{Ni}_{50.7}$ (ат.%). При охлаждении и нагреве исследуемых образцов наблюдали только мартенситное превращение (МП) $\text{B2} \leftrightarrow \text{B19'}$ (где В2 – высокотемпературная фаза, а В19' – моноклинная мартенситная фаза). Температуры начала и конца МП в фазу В19' составляли $M_H=252\text{K}$ и $M_K=223\text{K}$, а температуры начала и конца обратного МП в В2 фазу – $A_H=258\text{K}$ и $A_K=273\text{K}$.

Температура изотермических циклов «нагружение-разгрузка» образцов при кручении и изгибе составляла $298 \pm 2\text{K}$. Образцы сплава при данной температуре имели структуру В2-фазы. Заданная в процессе нагружения образца деформация (γ_t или ϵ_t), включает неупругую ($\gamma_{нд}$ или $\epsilon_{нд}$) и пластическую ($\gamma_{тр}$ или $\epsilon_{тр}$) деформации. Суммарная неупругая деформация ($\gamma_{снд}$ или $\epsilon_{снд}$) является суммой величин эффектов сверхэластичности ($\gamma_{св}$ или $\epsilon_{св}$) и памяти формы ($\gamma_{эф}$ или $\epsilon_{эф}$): $\gamma_{снд} = \gamma_{св} + \gamma_{эф}$ и $\epsilon_{снд} = \epsilon_{св} + \epsilon_{эф}$. Накопленную при данной γ_t (или ϵ_t) пластическую деформацию ($\gamma_{тр}$ или $\epsilon_{тр}$) определяли как остаточную деформацию при завершении формовосстановления в процессе нагрева разгруженных образцов. В каждом последующем цикле γ_t (или ϵ_t) увеличивали.

В результате исследования было обнаружено, что зависимости суммарной неупругой деформации, полученные при изгибе и при перерасчёте деформации кручения в эквивалентные ей деформации растяжения (по Мизесу), практически совпадают, рисунок 1. При этом возврат неупругой деформации в режиме проявления ЭПФ в образцах, деформированных изгибом, на 1–2% превышает ЭПФ образцов, деформированных при кручении. Однако значение сверхэластичности при изгибе (ϵ_t от 8% до 24%), $\epsilon_{св}$ на 1 – 2% меньше величины эффекта сверхэластичности при кручении этих же образцов. Это связано с тем, что развитие пластической деформации при изгибе приводит к более эффективной стабилизации мартенситной фазы В19' в изотермических циклах «нагружение – разгрузка» при 298 К.

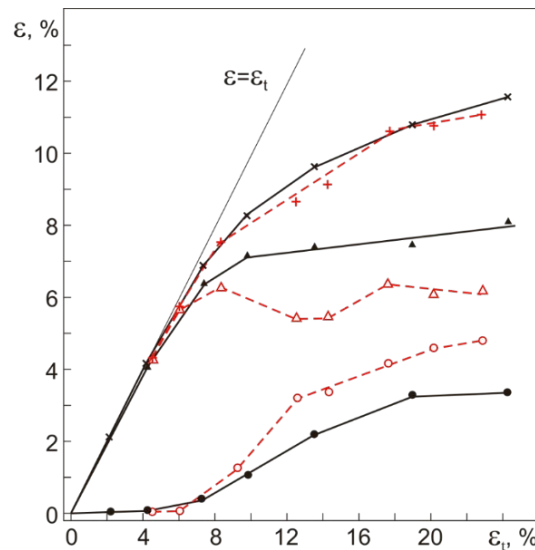


Рисунок 1 - Зависимости $\varepsilon_{св.}$ (Δ , \blacktriangle), $\varepsilon_{ЭПФ}$ (\circ , \bullet), $\varepsilon_{СНД}$ ($+$, \times) от заданной деформации ε_t при изгибе (пунктирная линия) и при кручении (сплошная линия). Деформации кручения γ_t , $\gamma_{св.}$, $\gamma_{ЭПФ}$ и $\gamma_{СНД}$ перерасчитаны в соответствующие эквивалентные деформации при растяжении ε_t , $\varepsilon_{св.}$, $\varepsilon_{ЭПФ}$ и $\varepsilon_{СНД}$ (по Мизесу). Крупнозернистые образцы сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ (ат.%), $T_d = (298 \pm 2)$ К

Пластические деформации при изгибе образцов исследуемого крупнозернистого сплава и пластические деформации, полученные при перерасчёте деформации кручения в эквивалентные ей деформации растяжения при заданных деформациях ε_t до $\sim 24\%$ (эквивалентная деформация кручения $\gamma_t \sim 36\%$) также близки.

Проведён анализ собственных результатов и литературных данных по влиянию различных способов задания деформации образцам, в том числе пластической деформации, на особенности накопления и последующего возврата неупругой деформации в виде эффектов сверхэластичности и памяти формы в сплавах с термоупругими мартенситными превращениями. Показано, что ресурс суммарной обратимой неупругой деформации во всём интервале заданных деформаций практически не зависит от схемы деформирования (изгиб или кручение) и достигает $\sim 11\%$ при $\varepsilon_t = 24\%$, что хорошо соответствует максимальной теоретической величине мартенситной деформации, полученной для мартенситного превращения $B2 \leftrightarrow B19'$ в сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ (ат.%) в [1].

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации № МК-1057.2020.8, гранта РФФИ №18-48-70040 р_а и государственного задания ИФПМ СО РАН, проект III.23.2.2.

Список литературы

1. Прокошин С.Д., Коротницкий А.В., Браиловский В., Инаекян К.Э., Дубанский С.М. Кристаллическая решётка мартенсита и ресурс обратимой деформации термически и термомеханически обработанных сплавов Ti-Ni с памятью формы. // ФММ. – 2011. – Т.112. – №2. – С.180-198.